

SINTOMATOLOGÍA DE LA CORROSIÓN EN BARRAS DE ACERO DE ARMAR EMBEBIDAS EN MORTEROS CON INCORPORACIÓN DE ESCORIAS BLANCAS DE HORNO CUCHARA

¹María Isabel Prieto; ²Alfonso Cobo; ³Ángel Rodríguez, ⁴Juan Manuel Manso;

¹ *Profesora Titular de Escuela Universitaria: Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid*

² *Catedrático de Escuela Universitaria: Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid*

³ *Director del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingenierías de la Construcción y del Terreno, Universidad Politécnica de Burgos*

⁴ *Director del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Burgos*

Palabras Clave: *Corrosión, armaduras, morteros, escorias blancas LFS*

Resumen

El objetivo del presente trabajo es estudiar la sintomatología que produce la corrosión de barras de acero de armar embebidas en probetas de mortero, en las que se han incorporado escorias blancas de horno cuchara (LFS) sustituyendo parte del árido y del cemento y añadiéndose en el momento del amasado, distintos porcentajes de ión cloruro en peso de cemento. Se han fabricado probetas prismáticas de $6 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$, en las que se han embebido 3 barras de acero de diámetro 6 mm, en las cuales se ha estudiado el comportamiento a corrosión en probetas con presencia de cloruros durante 180 días. Posteriormente se ha corroído aceleradamente la barra central de las probetas con porcentajes de ión cloruro del 1,2 y 2%, conectándolas a una fuente de corriente para hacer pasar una intensidad constante de 1,3mA, equivalente a una corrosión $10 \mu\text{A}/\text{mm}^2$.

Una vez observados los efectos que la corrosión produce en las barras de acero de armar mediante medidas de velocidad de corrosión, técnicas gravimétricas y observación de la sintomatología, se puede afirmar que el comportamiento es similar en las probetas patrón y en las probetas con escorias para porcentajes de 1,2 y 2% de ión cloruro en peso de cemento..

Introducción

El hormigón armado permite aprovechar la elevada resistencia a tracción del acero con la elevada resistencia a compresión del hormigón, por lo que es un material perfecto para resistir esfuerzos de flexión y compresión, aunque la inclusión del acero en el hormigón conlleva una patología habitual en las estructuras de hormigón armado, que es la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón y que afecta a la durabilidad de las mismas.

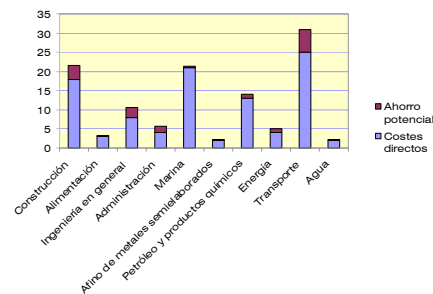
La Instrucción de Hormigón Estructural EHE [1] define la durabilidad de una estructura de hormigón como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como

consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. La vida útil de una estructura de hormigón armado depende principalmente de la composición del hormigón, la concentración de cloruros, el tiempo y las condiciones de exposición, la relación agua/cemento, la cantidad de cemento y de la resistencia mínima del hormigón empleado [2] [3]. La norma EHE además de limitar la cantidad de cloruros que pueden poseer cada uno de los materiales componentes, limita que el contenido total de cloruros en un hormigón que contenga armaduras no activas, debe ser inferior al 0,4% del peso de cemento en obras de hormigón armado o en obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración.

En la figura 1 se pueden observar los costes directos que genera la corrosión y el posible ahorro que se podría conseguir poniendo los medios necesarios [4].

En el fenómeno de la corrosión hay que tener en cuenta que las armaduras embebidas en el hormigón se encuentran en estado pasivo debido al efecto protector de la alcalinidad que aporta el cemento al hidratarse. Esta protección se puede perder bien por efecto de la penetración del dióxido de carbono de la atmósfera a través de los poros del hormigón (carbonatación) o bien por la acción de los iones cloruros, que pueden introducirse bien en los materiales que lo componen o penetrar desde el exterior [5][6].

Figura 1: Costes directos de la corrosión y el posible ahorro potencial



Para poder evaluar el proceso de corrosión en las barras de acero, las técnicas electroquímicas son los métodos empleados, por su fiabilidad, su rapidez de realización y su carácter no destructivo [7]. La velocidad de corrosión que se puede aceptar en una estructura, no está clara. Según el estudio realizado por Broomfield [8], se observa una gran discrepancia de criterios, aunque bien es cierto, que los resultados se han obtenido con distintos instrumentos, sobre diferentes estructuras y en condiciones diferentes. Determinados ensayos muestran que velocidades de corrosión de $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan lugar a riesgos importantes en las EHA en periodos de tiempo entre 5 y 10 años [9].

Por otro lado, la producción de acero bruto en el año 2010 en la Unión Europea, fue aproximadamente de 172,9 mt al año, encontrándose España en el tercer lugar con una producción 16,3mt, fabricándose la mayor parte en Hornos de Arco Eléctrico (EAF) y Hornos Cuchara (LF). Entre los residuos generados, los más importantes son las escorias negras (120-150kg por tonelada de acero producido) y las escorias blancas (40-70kg por tonelada de acero)[10], ascendiendo en España a de 2,55mt al año.

La incorporación de escorias blancas procedentes de la metalurgia secundaria como materia prima de otros productos, es muy importante por los problemas medioambientales que genera su presencia en los vertederos. Pero para que esta incorporación sea posible, es necesaria su estabilización dimensional, un estudio exhaustivo de su comportamiento y una infraestructura que permita su aprovechamiento a coste razonable. Actualmente existen pocas referencias sobre estudios de este tipo de escorias procedentes del proceso de afino en los

Hornos Cuchara [11][12] y aunque existe documentación exhaustiva sobre el comportamiento a corrosión de elementos de mortero u hormigón sometidos a procesos de corrosión, no hay apenas estudios sobre el comportamiento a corrosión en elementos que poseen escorias.

Trabajo experimental

Los materiales empleados para la realización de este trabajo experimental son cemento Pórtland CEM I/42,5 R, agua urbana potable, arena, escorias blancas de horno cuchara (LFS), plastificantes y retardadores de fraguado.

Las escorias blancas que se han empleado proceden de una factoría con sede en Álava, España. Una vez estabilizadas, se ha procedido a su caracterización, obteniendo las características físicas y químicas que se detallan en la tabla 1.

Para la realización de esta investigación se han fabricado dos series de cuatro morteros con diferentes dosificaciones de cemento, arena y agua, empleadas como probetas patrón y otras, a las que se les ha añadido escorias blancas de horno cuchara, además de añadir en el momento del amasado porcentajes de ión cloruro correspondientes al 0, 0,4, 0,8, 1,2 y 2% en peso de cemento. Una vez estudiado su comportamiento frente a los cloruros en las probetas con y sin escorias, se procedió a corroer aceleradamente las probetas correspondientes a la dosificación MCE (con escorias) y MCC (patrón), cuyas dosificaciones se detallan en la tabla 2, para las probetas con porcentajes de ión cloruro del 1,2 y 2% en peso de cemento.

Tabla 1: Características físicas y químicas de las escorias blancas de horno cuchara.

PROPIEDAD	VALOR	ÓXIDOS	(%)
Densidad	2,65 g/cm ³	CaO	56
Superficie específica	2064 cm ² /g	SiO ₂	17
Cloruros	Ausencia	Al ₂ O ₃	11
Cantidad total de azufre, expresada en ión sulfato	<1%	MgO	10
Terrones de arcilla	Ausencia	Otros (Fe ₂ O ₃ +MnO+TiO ₂ +SO ₃ +Na ₂ O+K ₂ O)	6
Materia orgánica	Ausencia		

Tabla 2: Dosificaciones de las probetas patrón y de las probetas con escorias blancas de horno cuchara.

	Relación en peso (C/A/W/E)			
	Cemento	Arena	Agua	Escorias
MCE	1	6,43	1,66	2,57
MCC	1	6	1,03	

Se realizaron probetas prismáticas de 6x8x2cm³ de mortero en las que se embebieron 3 barras de acero de armar de diámetro 6mm.(Figura 2).

A pesar de las numerosas medidas de velocidades de corrosión y potenciales de corrosión obtenidas y que demuestran que tanto las probetas patrón como las probetas con escorias, para distintos porcentajes de ión cloruro, se encuentran en procesos de corrosión importantes, la sintomatología externa no era demasiado

evidente, así que se procedió a acelerar el proceso corrosivo conectando a una fuente de corriente tanto la barra central de las probetas patrón como la de las probetas con escorias correspondientes a las dosificaciones MCE y MCC, con porcentajes de ión cloruro del 1,2 y 2%, de las que se conoce perfectamente su comportamiento frente a la corrosión hasta su inicio del proceso de corrosión acelerada. Una vez conectadas a la fuente de corriente, se hizo pasar una intensidad de corriente constante de 1,3mA por cada barra, que equivale a $10\mu\text{A}/\text{mm}^2$. Figura 3.

A partir de ese momento, se procedió a medir periódicamente los potenciales necesarios para mantener la corriente prefijada, así como a observar los síntomas de corrosión que paulatinamente han ido apareciendo en las probetas. De forma periódica también se humedecieron las probetas, ya que la presencia de agua controla la cinética de la corrosión. La medida del potencial varía mucho en función del contenido de humedad de las probetas, de ahí que se realizara una medida antes de humedecer las probetas y otra a posteriori, cuando el potencial estaba estabilizado.

Figura 2. Probetas prismáticas.

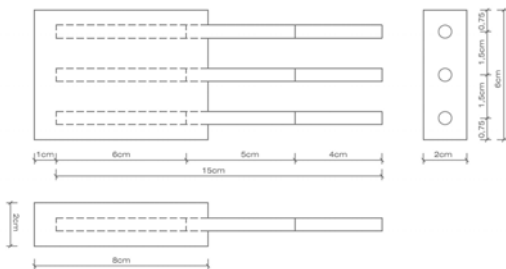


Figura 3. Montaje del experimento de corrosión acelerada.

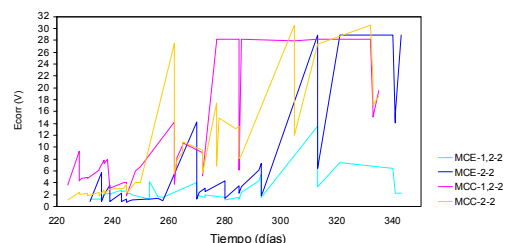


Resultados

La figura 4 muestra que tanto en las probetas con un 1,2% como en las que tienen un 2% de ión cloruro, las probetas patrón necesitan mayores potenciales para mantener la intensidad de corriente prefijada que en las probetas con escorias

También se puede observar que en probetas con un 2% de ión cloruro se necesitan mayores potenciales para mantener la misma intensidad que en probetas con un 1,2% de ión cloruro.

Figura 4. Comparación de los potenciales necesarios para mantener una intensidad de corriente constante de 1,3mA en probetas con dosificaciones MCE y MCC y con porcentajes de ión cloruro del 1,2 y 2%.



Los saltos que se pueden observar en la figura 4, muestran la importancia del contenido de humedad en la resistencia del mortero al paso de la corriente, ya que cada vez que se humedecen las probetas, disminuye drásticamente el

potencial, para ir de nuevo aumentando a medida que desciende el contenido de humedad.

En la figura 5 se muestra el efecto de la corrosión en las probetas con 1,2% de ión cloruro en peso de cemento, tanto en las probetas patrón como en las probetas con escorias sometidas al proceso de corrosión acelerada, pudiéndose observar que se han producido patologías semejantes, apareciendo manchas de óxido en la barra central de las probetas. Este tipo de patologías se producen en procesos de corrosión avanzados, de modo que se ven reflejados físicamente los valores obtenidos mediante técnicas electroquímicas en las mismas probetas, en las que incluso antes de someterlas al proceso de corrosión acelerada ya presentaban velocidades de corrosión de aproximadamente $2\mu\text{A}/\text{cm}^2$, correspondientes a valores de corrosión muy alta.

En las figuras 6 se muestran los efectos que la corrosión acelerada ha producido en las probetas patrón con un 2% de ión cloruro en peso de cemento, en las que han aparecido manchas significativas de óxido, así como en las probetas con un 2% de ión cloruro en peso de cemento y que poseen escorias blancas de horno cuchara, en las que además de manchas de óxido han aparecido fisuras.

Una vez desconectadas las probetas de la fuente de corriente, se rompieron las probetas, se decaparon las barras, se aisló la zona de barra embebida en el mortero, se pesó y se midió la longitud efectiva, pudiéndose evaluar la pérdida de masa experimentada por las barras. La figura 7 muestra el efecto de la corrosión producida en las barras embebidas en probetas con 2% de ión cloruro.

La tabla 3 muestra la relación entre las velocidades de corrosión obtenidas por métodos electroquímicos y la pérdida de masa obtenida por gravimetría. Como se puede observar, tanto en las probetas patrón como en las probetas con escorias, las barras de acero se encuentran en estado activo y las pérdidas de masa por corrosión son inferiores en probetas con 1,2% de ión cloruro que en las

Figura 5. Manchas de óxido en las dosificaciones MCE y MCC y 1,2% de ión cloruro en peso de cemento.

a) Probetas con escorias a los 27 y 71 días.



b) Probetas patrón a los 26 y 81 días.



Figura 6. Manchas de óxido en las dosificaciones MCE y MCC y 2% de ión cloruro en peso de cemento.

a) Probetas con escorias a los 21 y 81 días.



b) Probetas patrón a los 6, 7 y 81 días.



Figura 7. Síntomas de corrosión en las barras 86 y 206 una vez aplicada la corrosión acelerada



Tabla 3: Pérdida de masa por corrosión en probetas patrón y en probetas con escorias.

	MCE 1,2%	MCE 2%	MCC 1,2%	MCC 2%
i_{corr} $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	1,186	2,432	0,9086	3,087
Pérdida masa g/m^2	4,99	19,13	4,82	18,49

probetas con 2% de ión cloruro, aunque son ligeramente inferiores en las probetas patrón que en las probetas con escorias.

Conclusiones

La corrosión acelerada de las dosificaciones MCE y MCC, muestran que para porcentajes de ión cloruro del 1,2 %, los potenciales necesarios para mantener la intensidad de corriente prefijada es mucho mayor en probetas patrón que en probetas con escorias, mientras que en probetas con un 2% de ión cloruro, el comportamiento de las probetas con y sin escorias es semejante.

La sintomatología que ha producido la corrosión acelerada muestra que en las dosificaciones MCE y MCC, con un 1,2% de ión cloruro, los únicos síntomas de corrosión son manchas de óxido en el canto y la cara inferior de la probeta, siendo éstas más acentuadas en la probeta patrón. En cuanto a las probetas con un 2% de ión cloruro, las probetas con escorias, además de manchas de óxido presentan fisuras paralelas a la barra central, mientras que las probetas patrón, con 2% de ión cloruro, presentan importantes manchas de óxido pero no se han llegado a fisurar, aunque aparecieron en periodos más cortos de tiempo.

La pérdida de masa experimentada tanto en las probetas patrón como en las probetas con escorias, para porcentajes de ión cloruro del 1,2 y 2% son semejantes.

REFERENCIAS

- [1] EHE, "Instrucción de Hormigón Estructural"- 2008, pp. 105 -116.
- [2] ANDRADE, C., Cemento-hormigón, 788, "Vida útil y vida residual de obras en medios marinos" -1998, pp. 1004-1019.
- [3] ROSTAM, S, Cuadernos INTEMAC, 61, "Vida útil de las estructuras de hormigón" - 2006, pp.1-49.
- [4] OTERO, E. Corrosión y degradación de materiales - 1997, pp.17-30.
- [5] COBO, A., Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación" - 2001, pp. 57-86.
- [6] GONZÁLEZ, J.A. "Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas". - 1989, pp. 323 - 365.
- [7] GONZÁLEZ, J.A. Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamento, medida, diagnosis y prevención - 2007, pp. 197 - 205.
- [8] BROOMFIELD, J.P, "Life prediction of corrodible structures" NACE Symposium, Cambridge - 1991, Paper 14.
- [9] GONZÁLEZ, J.A., "Corrosión en las estructuras de hormigón armado: Fundamento, medida, diagnosis y prevención".- 2007, pp. 197-205.
- [10] LUXÁN, M.P., "Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. Caracterización previa de las escorias" - 1995
- [11] LOSÁÑEZ, M., "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil" - 2005.
- [12] RODRÍGUEZ, A., "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" - 2008.